

Disseny i realització d'una campanya de mesures aerodinàmiques sobre objectes

David Amat, Pol Gurri, Gerard Jiménez, Jordi Puig i Lluç Sendra

El túnel de vent és una eina d'investigació emprada en aerodinàmica per estudiar l'efecte del moviment de l'aire al voltant d'objectes sòlids. En aquest projecte, s'ha dut a terme una campanya de mesures aerodinàmiques en el túnel de vent de l'Escola Superior d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeronàutica de Castelldefels (EETAC) amb anemometria de fil calent i amb Tub de Pitot sobre el perfil cilíndric AF101, el perfil alar NACA 0012 i diversos automòbils a escala. D'aquesta manera, s'han trobat els principals paràmetres aerodinàmics que els caracteritzen. Finalment, s'han extret conclusions de la resistència aerodinàmica que presenten els automòbils tot comparant les seves forces de *drag*.

Paraules clau: Aerodinàmica, túnel de vent, força de *drag*.

I. INTRODUCCIÓ

L'aerodinàmica és la branca de la dinàmica de fluids que estudia el moviment de l'aire quan aquest interacciona amb un objecte sòlid. L'eina científica fonamental que simula les condicions reals experimentades per l'objecte és el túnel de vent. Particularment, s'ha emprat el túnel de vent de l'Escola Superior d'Enginyeria de Telecomunicació i Aeronàutica de Castelldefels (EETAC), el qual aspira l'aire a través d'un ventilador, podent simular unes velocitats compreses entre 0 i 120 km/h.

L'objectiu fonamental d'aquest projecte ha estat caracteritzar aerodinàmicament el perfil cilíndric AF101, el perfil alar NACA 0012 i diversos automòbils a escala. L'equip d'adquisició de dades emprat (*software*) ha estat el Verstatile Data Acquisition System VDAS-F i el Tub de Pitot Transversal AFA7 i una sonda de fil calent com a *hardware*.

Així doncs, pel perfil cilíndric AF101 s'ha dut a terme una comparació de les velocitats horitzontal i vertical abans i després del perfil emprant l'anemòmetre de fil calent. A més, gràcies a elles, s'han calculat els errors i les turbulències produïdes. Pel perfil alar NACA 0012, s'ha realitzat un perfil de pressions amb diferents velocitats (i angle fix), un perfil de pressions amb diferents angles d'atac (i velocitat fixa) i una representació de la força de sustentació (o força de *lift*) segons l'angle d'atac.

Finalment, s'han mesurat i comparat, mitjançant una balança de tres components, les forces de resistència aerodinàmica (o força de *drag*) de diferents models d'automòbils a escala: BMW Serie 4, un Volkswagen Escarabat i un Ferrari Testarossa. A més, pels dos últims s'han dut a terme les mesures amb les finestres obertes i tancades, per veure com aquest factor influeix en l'aerodinàmica d'ambdós.

II. METODOLOGIA

II.1 Perfil cilíndric AF101

En aquest apartat es pretén mesurar les velocitats del vent en incidir en una figura cilíndrica situada horitzontalment al túnel. Es compararà el perfil de velocitats verticals (en sentit perpendicular al cilindre) d'abans d'incidir amb el perfil just després de la figura, i es connectaran aquestes variacions de velocitat i els errors en les mesures amb la turbulència que aquesta provoca en el flux del fluid. Per a dur a terme l'experiment, es fixarà una velocitat constant del vent al túnel, concretament de 20,78 m/s, i es faran mesures amb un anemòmetre de fil calent per observar com aquesta es veu afectada per la posició del cilindre. Aquestes mesures són de voltatge i per tant, per obtenir valors de velocitats, es van mostrejar varies velocitats per fer un ajust polinòmic de la característica velocitat-voltatge (*Annex 1*). L'anemòmetre ens proporciona 1000 mesures per segon (freqüència de mostreig: 1KHz), cosa que ens permetrà promitjar-les i també obtenir errors.

A totes les mesures se'ls restarà l'efecte del suport del cilindre, que ha estat prèviament determinat.

Com a aproximació per la velocitat incident, se suposarà que aquesta és constant en tot el perfil vertical del túnel i s'agafarà el valor obtingut per l'anemòmetre en el punt mig d'aquest, just davant del cilindre. Es tracta d'una bona aproximació ja que el aquest es troba suficientment lluny de les parets i, per tant, del fregament en el vent que indueixen.

Aprofitant el fet de mesurar el flux abans que el cilindre pertorbi el sistema, es faran un seguit de mesures de velocitats en tot el perfil horitzontal del túnel per visualitzar l'efecte de les parets en el flux. A partir d'aquest perfil representem dues gràfiques: velocitat del fluid en funció de la posició horitzontal i intensitat de turbulència en funció de la posició horitzontal (*Figures 1 i 2*). La turbulència s'ha calculat dividint la desviació estàndard a cada punt pel seu valor mitjà de la velocitat i es representa en percentatges.

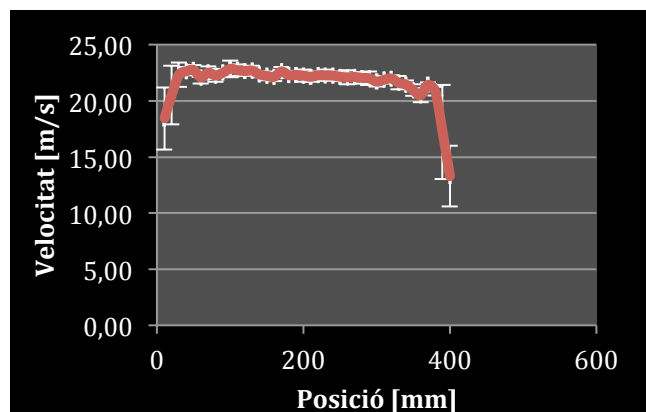


Figura 1. Perfil de velocitats horitzontal sense cilindre. Les línies verticals a casa punt representen la incertesa (desviació estàndard).

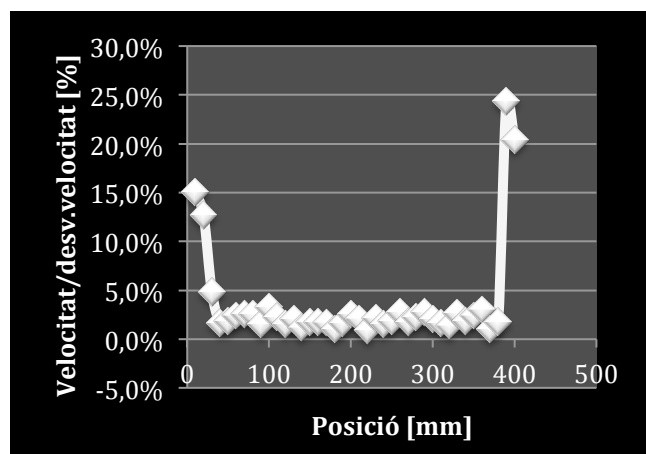


Figura 2. Intensitat de turbulència pel perfil horitzontal sense cilindre.

Per l'esmentada posició central obtenim una velocitat mitjana de 22,25 m/s amb una desviació estàndard de 0,57 m/s, dades que extrapolarem a tot el perfil d'aire incident.

Es pot apreciar com la velocitat disminueix en apropar el perfil a les parets degut al fregament, així com la intensitat de turbulència augmenta per les turbulències produïdes per aquest.

Un cop adquirida la velocitat incident, es calcularà el perfil vertical just després del cilindre. Es tornarà a procedir de la mateixa manera, promitjant velocitats i calculant desviacions estàndard, però ara mostrejant en vertical: modificant la altura de l'anemòmetre en cada mesura. S'obtenen les següents gràfiques de velocitat i turbulència (Figures 3 i 4).

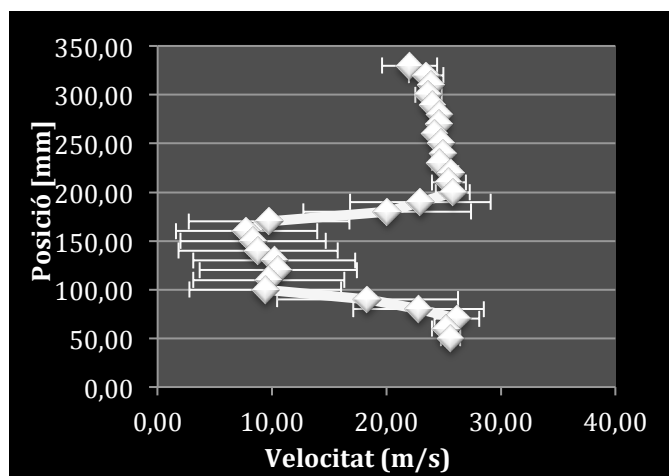


Figura 3. Perfil de velocitats vertical mesurat després del cilindre. Les línies horitzontals són la desviació de la mesura a cada punt.

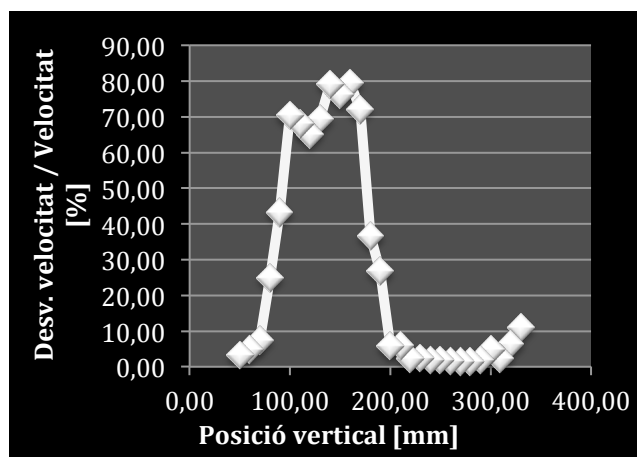


Figura 4. Turbulència per a cada punt del perfil vertical.

S'aprecia com les velocitats es redueixen molt després del cilindre degut a que la transferència de moment de l'aire al cilindre es tradueix en una força de *drag*, que serà calculada experimentalment a continuació. També es pot apreciar com a les posicions del mig (on hi ha el cilindre) hi ha molt error, cosa que ja era d'esperar ja que el cilindre provoca turbulències (com es veu a la Figura 4).

Finalment es pretén calcular la força de *drag* o desplaçament lateral induïda al cilindre pel flux de vent. Representem la resta de velocitats incident menys la de després del cilindre a la Figura 5.

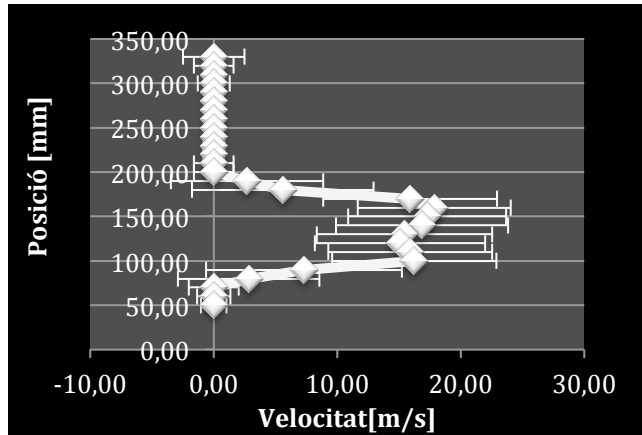


Figura 5. Diferència de velocitats abans i després del cilindre.

En la gràfica es pot veure com la diferència de velocitats tendeix al zero en allunyar-nos del cilindre, cosa òbvia ja que no es transmet moment en forma de *drag* a cap objecte. Per a trobar el *drag* que reb el cilindre, es restarà el perfil constant de velocitats incidents menys el perfil posterior, i duent a terme conservació del flux massic ($\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$), es troba:

$$\begin{aligned} F_{drag} &= \rho \cdot (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \\ &= \rho \cdot L \left(\frac{\sum v_{despres} \cdot \Delta y}{v_{abans}} \cdot v_{abans}^2 - \sum v_{despres}^2 \cdot \Delta y \right) \\ &= \rho \cdot L \sum v_{despres} \cdot (v_{abans} - v_{despres}) \cdot \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

On v són les velocitats abans i després del cilindre, L la longitud del cilindre, h_1 l'altura al centre del cilindre i Δy és l'increment de posició vertical de cada punt on calculem la velocitat. D'aquí trobem h_1 que la col·locarem posteriorment en la fórmula de la força de *drag*.

Aquesta fórmula la implementem a les nostres dades experimentals on, en aquest cas, a cada interval considerarem la $v_{despres}$ com la mitja de les velocitats a extrem i extrem del interval.

D'aquesta manera, finalment s'obté un *drag* de 6,5 N. El *drag* mesurat directament mitjançant la balança de tres components és de 5,09 N. Aquesta diferència és normal, ja que degut a les turbulències darrere el cilindre hi ha molta incertesa en les velocitats.

A continuació es pretén calcular el coeficient de "drag" del cilindre mitjançant la mesura d'aquesta força per a diferents velocitats del vent incident. Donades les relacions:

$$p_d = \frac{F_{drag}}{S} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

On P_d és la pressió associada a la força de *drag* del cilindre i P és la pressió del túnel, es pot deduir que la gràfica P_d/P ha de ser una recta de pendent C_d , per tant aquest pendent és el que es cerca. Mesurant la força s'obté la P_d , i mitjançant un sensor de pressió que porta incorporat

el cilindre s'obté la P . Representant aquestes pressions de forma gràfica en la forma P_d en funció de P s'obté una recta, que s'imposa que passi pel zero (Figura 6).

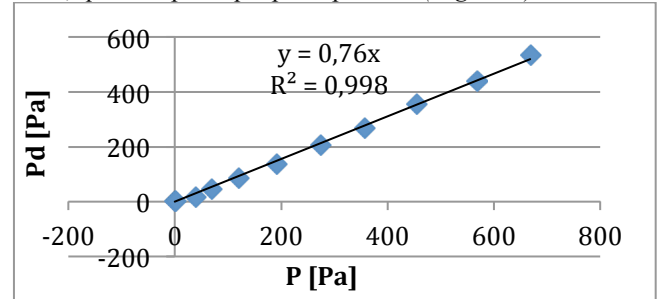


Figura 6. P_d en funció de P . Recta de pendent C_d .

A partir del gràfic obtingut experimentalment, calculem el pendent i l'error en aquest, doncs la mesura de P és un promig, i obtenim: $C_d = 0.76 (+/-0.014)$.

Finalment i per concloure els experiments amb aquesta figura, es calcularà la força de *drag* en el cilindre per una velocitat incident de 27 m/s mitjançant el sensor de pressions del que disposa. Per a calcular el *drag* total, es promitjaran les mesures de pressió preses per diferents angles de situació del sensor, tot ponderant les mesures pel cosinus de l'angle (pressió horitzontal, pressió de *drag*). En la taula es pondera pel sinus ja que les mesures es van començar a fer des dels 90° respecte la incidència del vent (forat mirant cap a dalt) i per mesurar el *drag* només volem la força en posició horitzontal.

A la Figura 7, es presenten les mesures fetes per a cada angle, gràcies a les que es calcula el valor final del *drag*: 6,34 N amb un error de 0,00104 N.

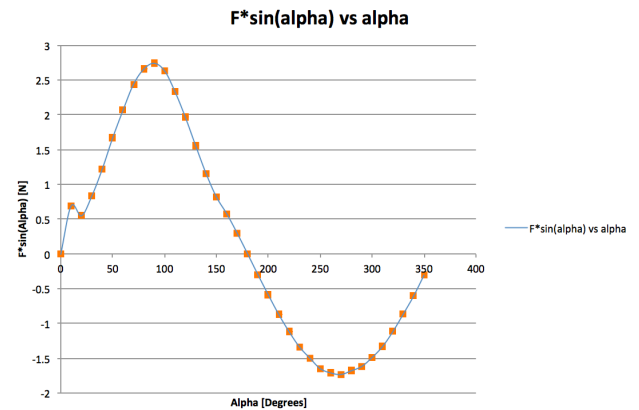


Figura 7. Mesures de la pressió horitzontal per a cada angle de gir del sensor.

II.2 Perfil alar NACA 0012

A continuació es duran a terme diferents mesures per caracteritzar el comportament a diferents velocitats i angles d'atac d'un perfil alar. Concretament es mesuraran trets importants com són el perfil de pressions a la superfície de l'ala, o la força de sustentació o "lift" que reb l'ala a causa del flux d'aire incident.

Es mesuren i posteriorment representen els següents perfils:

II.2.2.1 Perfil de pressions amb diferents velocitats (angle d'atac fix a 15°)

Es representa el perfil de pressions a cada punt de la superfície del perfil alar, tant per la superfície superior com la inferior (línies de dalt i abaix respectivament), segons la distància respecte al punt frontal del perfil. Es representen dues velocitats diferents per mostrar que a velocitats baixes les diferències de pressió són petites.

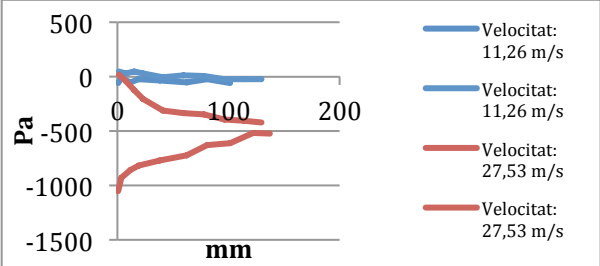


Figura 8. Perfil de pressions a les superfícies superior i inferior del perfil alar en funció de la distància respecte al punt frontal. Perfils per dues velocitats del vent: 11,2 m/s i 27,5 m/s.

II.2.2.2 Perfil de pressions amb diferents angles d'atac (velocitat fixa: 20,78 m/s)

Es duen a terme les mateixes mesures: el perfil superficial de pressions a l'ala, però aquesta vegada el que es modifica és l'angle d'atac. Es pot apreciar com en augmentar l'angle, la incidència del vent és cada cop més perpendicular, donant lloc a una mesura superior de la pressió.

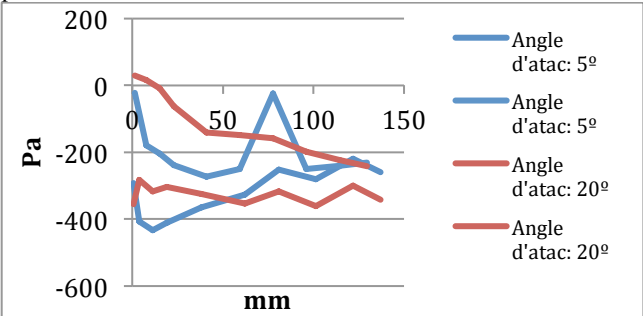


Figura 9. Perfil de pressions de l'ala per una velocitat fixa i dos angles d'atac diferents: 5° i 20°.

II.2.2.3 Lift segons l'angle d'atac

Es representa la força de sustentació, obtinguda de dues maneres diferents: calculant a través de la mesura de les pressions i mesurant directament. El "lift" es representa en funció dels angles d'atac, i la gràfica es duu a terme per a dues velocitats diferents i per a les dues maneres esmentades de calcular la sustentació. Es pot apreciar com a velocitats baixes la sustentació és pràcticament nul·la, i que per una determinada velocitat existeix un angle d'atac pel qual la sustentació és màxima, fet que té una notable

trascendència de cara a possibles aplicacions aerodinàmiques.

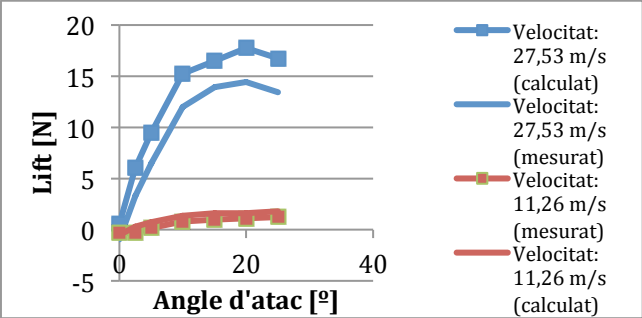


Figura 10. Representació de la força de sustentació en funció de l'angle d'atac de l'ala. Gràfiques separades per a la força calculada i mesurada, per a cada velocitat d'aire incident: 27,5 m/s i 11,2 m/s.

II.3 Automòbils

L'objectiu d'aquest experiment és mesurar i comparar amb la balança de tres components la força de resistència (o força de drag) de tres models d'automòbils diferents a escala. Alhora, també es volia veure com influeix el fet de tenir les finestres obertes o tancades en l'aerodinàmica de l'automòbil. per a fer-ho, s'ha dut a terme la mesura de la força de drag per un escombrat de velocitats de 0 a 33,3 m/s. Per a cada velocitat s'ha calculat el promig del drag i finalment s'ha fet el promig per obtenir-ne un únic valor.

FORÇA DE DRAG [N]	BMW SERIE 4	VOLKSWAGEN ESCARABAT	FERRARI TESTAROSSA
Finestres tancades	1,484955	1,352545	1,152727
Finestres obertes	---	1,522272	1,161818

Taula 1. Mesures del promig de la força de drag per als diferents models d'automòbils estudiats.

A la Taula 1 es recullen els resultats obtinguts per als diferents automòbils. D'on, en primer lloc, es denota que el Ferarri Testarossa és el que presenta una força de drag promig menor dels tres models i, per tant, esdevé el més aerodinàmic, com era d'esperar. A més, a la Figura X, veiem com en els tres casos la força de drag augmenta de forma exponencial amb la velocitat a la que es mou l'automòbil.

Alhora, també s'observa -especialment en el cas del Volkswagen Escarabat- l'efecte negatiu en termes aerodinàmics que suposen les finestres obertes. Doncs clarament en aquest cas podem veure com la força de drag notablement major en aquesta situació.

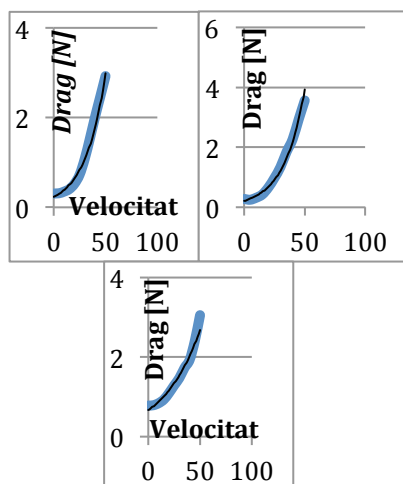


Figura 11. Força de drag [N] en funció de la velocitat [Hz] pels diferents models estudiats. A dalt: a l'esquerra, el Ferrari Testarossa, a la dreta, el Volkswagen Escarabat. A baix, el BMW Serie 4.

III. CONCLUSIONS

En aquest projecte, s'ha dut a terme una caracterització aerodinàmica completa dels perfils cilíndric AF101 i alar NACA 0012. De la comparació dels diferents automòbils, denotem la importància de l'aerodinàmica en el seu disseny i confirmem que el fet de portar les finestres baixades augmenta el consum de combustible, ja que la força de resistència (drag) a l'aire és major.

AGRAÏMENTS

Ens agradaria agrair al nostre professor i tutor del projecte Daniel Crespo la seva ajuda i col·laboració per de laboratori a emprar. Donar gràcies també a la UPC, concretament al Campus de Castelldefels, per donar-nos la oportunitat de treballar a les seves instal·lacions amb tot l'equipament que disposa.

APÈNDIX

1. Apèndix 1

L'anemòmetre proporciona mesures de voltatges. Amb l'objectiu de trobar la relació entre els voltatges i les velocitats, es van anar variant les velocitats (conegudes) del túnel i anotant els voltatges mesurats. D'aquesta manera, es va analitzar la gràfica de la velocitat en funció del voltatge *Figura 12*.

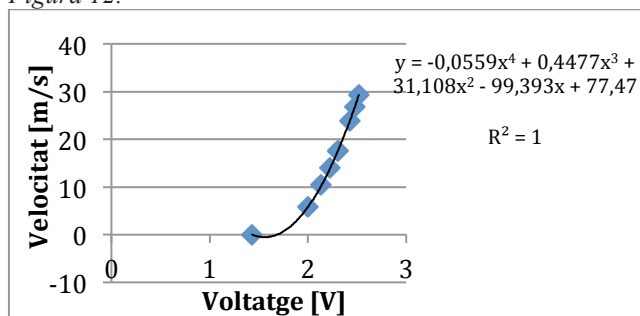


Figura 12. Ajust polinòmic de les velocitats que corresponen a cada voltatge.

S'esperava un comportament polinòmic d'ordre 4 i es pot veure com l'ajust ho demostra. Calculant el coeficient de correlació (R^2) s'obté que aquest és igual a 1, per tant és un bon ajust. A partir dels coeficients trobats del polinomi, es pot passar doncs de voltatges a velocitats, que és el que s'utilitza en tots els experiments esmentats.